

4. 科学设计方法

我们将介绍我们自己编写的适用于 RoboMaster 悬架及底盘设计的多刚体动力学仿真器和它在设计时的作用。

4.1 简介

4.1.1 动机

在大部分 RoboMaster 队伍中，悬架设计常常主要依靠实物测试，这与科学的设计方法相悖，而许多队伍会通过简单静力学计算部分悬架参数和最大受力，并对部分零件进行有限元分析和优化，少部分队伍会进行忽略悬架的飞坡模拟，但上述的方法存在很大的局限。在今年场地地形多变，对悬架及整车惯量参数要求较高的前提下，我们自己写了一个仿真器图 4-1。

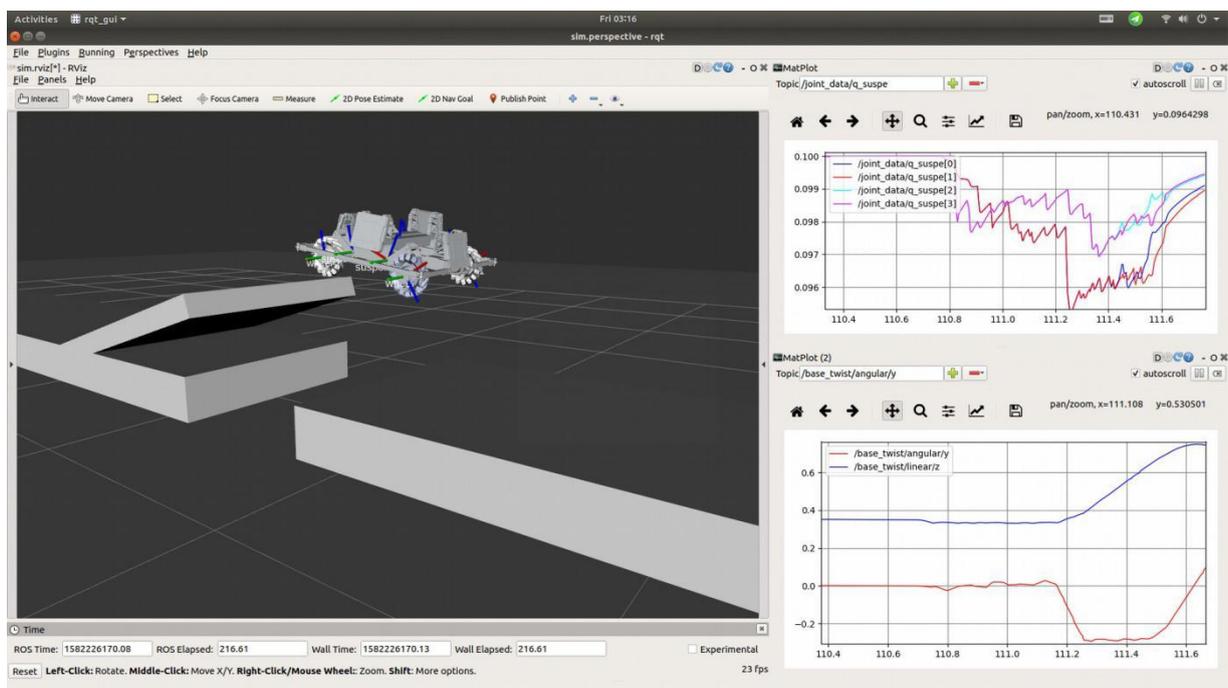


图 4-1 飞坡仿真时的截图

4.1.2 特性

- 计算时考虑悬架的所有参数(弹簧长度，预压，阻尼，各力臂长度等)
- 计算时考虑电机电磁模型
- 实时获取所有刚体的状态值(车体速度，车体旋转，弹簧推力，Ground reaction force，车轮扭矩等)
- 方便地修改各个刚体的惯量和重心，悬架的各个参数

- 多种仿真场景

4.1.3 仿真场景

我们将对以下场景进行模拟仿真分析：

1. 从设定高度丢下
2. 以设定速度下台阶
3. 以设定速度刹车/加速
4. 以设定速度飞坡
5. 以设定速度通过侧身通过斜坡

4.2 仿真计算的原理和实现

整个仿真计算的原理和实现都是较复杂的，这里将会省略很多细节。主要内容是“Floating Base Dynamics”与“Fake Suspension 假悬架”。

图 4-2 中展示了仿真计算的流程，圆角方框代表数据，椭圆代表一个计算过程，实心箭头代表数据流方向，空心箭头代表过程方向。粉色代表运动学相关数据及过程，蓝色代表动力学相关数据及过程，绿色代表同时涉及对运动学数据和动力学数据计算的过程。

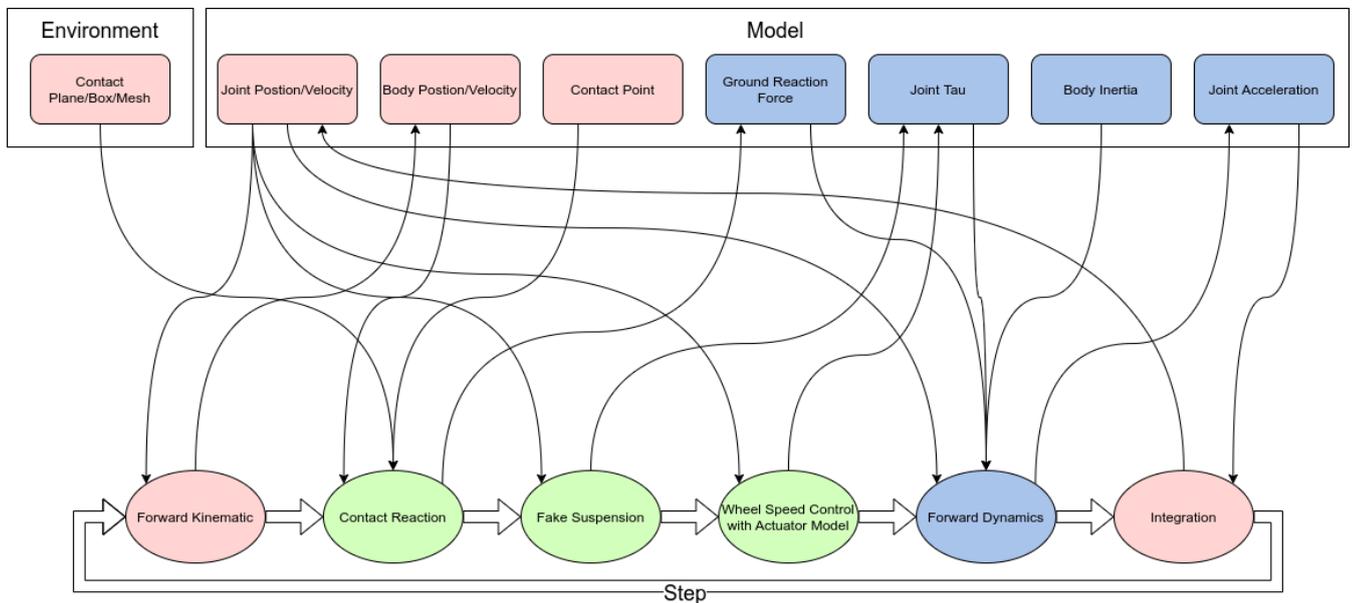


图 4-2 仿真计算的流程

4.2.1 Floating Base Dynamics:

传统的我们常讨论的机械臂，是固定在地面上，这意味着我们假设 **base body** 永远不会移动，我们称之为 **fix base robot**，如图 4-3 左，地面将提供补偿力矩 τ_b 来保证 **base** 被固定在地面上。它的动力学方程如下：

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) = \tau.$$

其中 q 为各关节角度， $h(q, \dot{q})$ 为离心和科氏力， $g(q)$ 为重力。

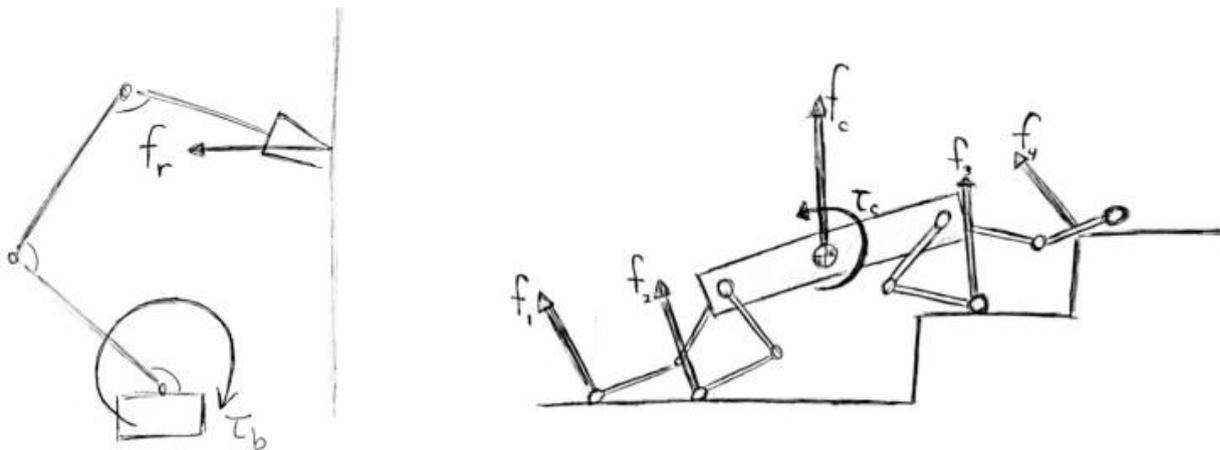


图4-3 左为 Fix Base Robot(机械臂)，右为 Floating Base Robot(四足机器人)

而像四足机器人，飞行器，RoboMaster 战车等机器人，如图 4-3 右，地面给四足机器人 **Ground Reaction Force** f_i 将转换成给 **base** 的力净力 f_c 和力矩 τ_c 将会改变 **base** 的位姿，我们称之为 **floating base robot**，它的动力学方程如下：

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) = S\tau + J_c^T F_c.$$

其中 q 为 **base** 六个自由度和各关节角度：

$$q = \begin{bmatrix} q_{base} \\ q_{joint} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{d+6}.$$

而 S 为选择矩阵：

$$S\tau = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \tau = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix}.$$

其中 J_c^T 为地面接触点的雅克比转置，可以牛顿欧拉刚体动力学求解：

- 正动力学：已知 q, \dot{q}, \ddot{q} ，求 τ ，用于运动规划拓扑
- 逆动力学：已知 q, \dot{q}, τ ，求 \ddot{q} ，用于仿真

在机器人的各个刚体的连接结构是开链(Open Chain)的情况下，将刚体和关节用树的结构表示，可以非常方便高效地从 **base body** 开始遍历计算出所有刚体的正运动学或者逆运动学，具体的理论可以参考书籍“*Modern Robotics*”。

4.2.2 Fake Suspension 假悬架

上文说道，大部分的 **Floating Base Dynamics** 的具体算法都需要 **Open Chain** 的拓扑结构。但所有悬架很明显都是 **Close Chain** 的结构。如图 4-4，在我们使用的步兵车的纵壁悬架中，悬架的摇臂与车身，避震器(弹簧和阻尼)三者构成 **Close Chain**，或者说并联，再加上弹簧的形变，在仿真计算中是比较棘手的。

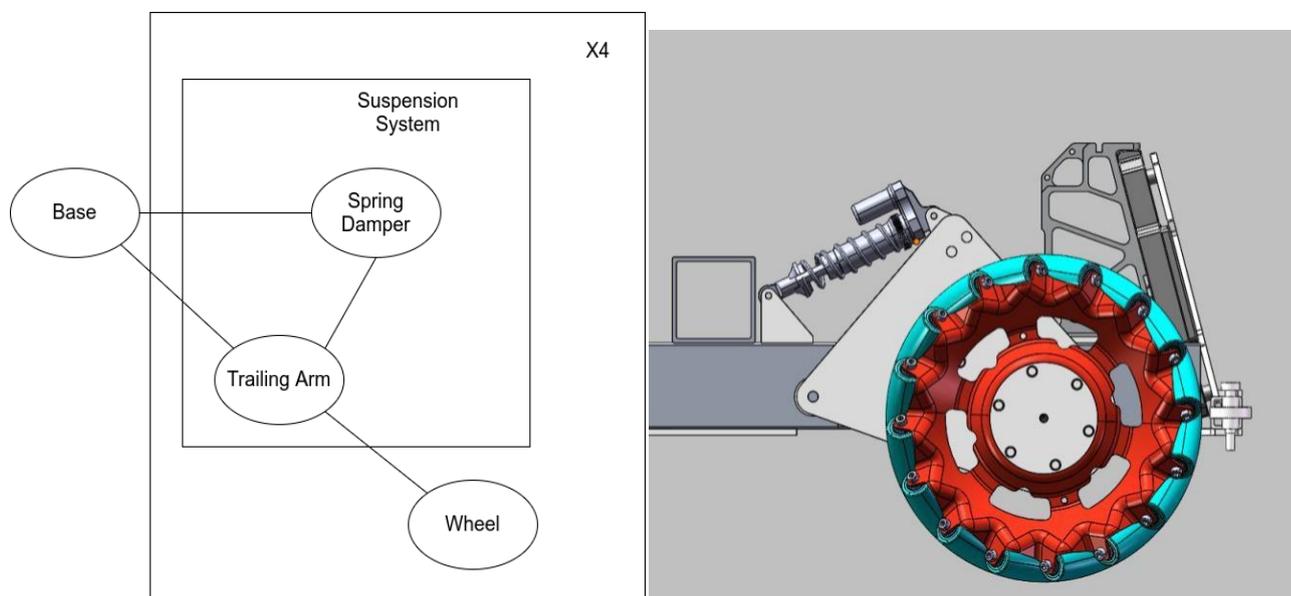


图4-4 常见的纵壁悬架系统，左为悬架的拓扑结构，右为 Solidworks 图纸

为此我们提出了概念 “**Fake Suspension**”，意为：先将避震器忽略，然后添加一个位于摇臂旋转轴的执行器来产生原避震器在该轴产生的力矩，更易于理解来讲就是用理想的电机充当“主动悬挂”，但是这个“主动悬挂”在每一个时刻都在假装我们仿真的悬挂，它的特性和我们仿真的悬架无异。这个 **Fake Suspension** 的解决方法优雅地化简了整个仿真问题，它在可以完全考虑悬架系统动力学的时候，让快速计算甚至实时计算高动态仿真场景(如：飞坡)成为可能。

如图 4-5, 其中绿色为刚体(共 9 个), 粉色的为自由度(共 14 个), 前 6 个自由度为 base body 的位姿, 剩余其中四个为 Fake Suspension, 另外是轮子执行器。

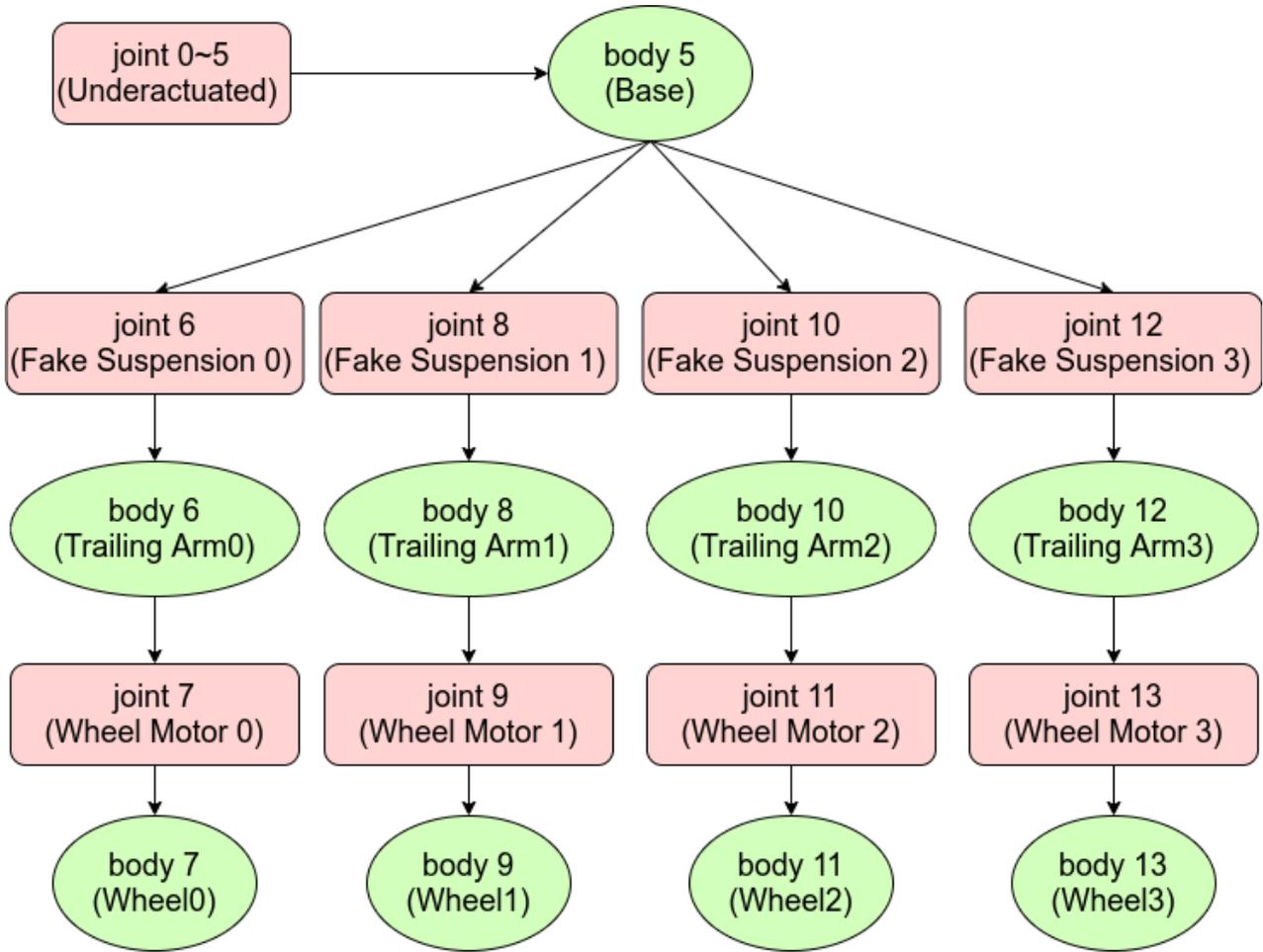


图4-5 底盘的树状结构

实现具体方法:

找到映射:

$$(\theta, \dot{\theta}) \rightarrow \tau$$

分解为:

$$\theta, \dot{\theta} \rightarrow s, \dot{s} \rightarrow f \rightarrow \tau$$

其中, θ 为 Fake Suspension 角度(不考虑关节角度原点 offset), f 为避震器推力(压缩为负方向), τ 为 Fake Suspension 力矩.

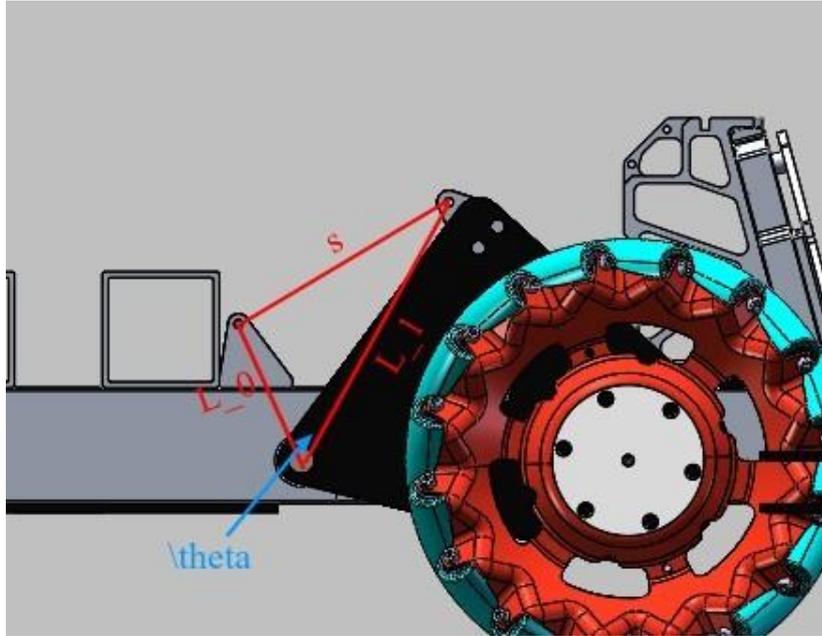


图4-6 各长度定义 角度的正方向为逆时针

通过简单的几何学知识可以得到这些映射：

$$s(\theta) = \sqrt{l_0^2 + l_1^2 - 2l_0l_1 \cos \theta}$$

$$\dot{s}(\theta, \dot{\theta}) = \frac{l_0l_1 \sin \theta}{s} \dot{\theta}$$

$$\Delta s = l_s - s$$

$$f(s, \dot{s}) = \begin{cases} 10000\Delta s - 50000(0 - \dot{s}) & \Delta s < 0 \\ 10000\Delta s - 50000(0 - \dot{s}) & \Delta s - l_r > 0 \\ k_p\Delta s - k_d(0 - \dot{s}) + f_{pre} & else \end{cases}$$

$$\tau(f, \theta) = -fl_1 \sin\left(\frac{\sin \theta l_0}{l_s}\right)$$

其中 l_s 为避震器原长, l_r 为避震器行程, f_{pre} 为弹簧预压, k_p 为避震器弹簧弹性系数, k_d 为避震器阻尼系数。

值得注意的是 $f(s, \dot{s})$ 的前两个情况使用了极高的比例和微分系数从而模拟碰撞, 达到限制避震器行程的仿真效果。

4.2.3 电机执行器模型

对电机执行器的特性也进行计算仿真，即期望力矩 τ_{des} 与实际力矩 τ_{act} 的关系：

$$i_{des} = \frac{\tau_{des}}{1.5k_t k_{gr}}$$

$$v_{bemf} = 2\dot{q}k_{gr}k_t$$

$$v_{des} = i_{des}R + v_{bemf}$$

$$v_{act} = \frac{v_{des}}{|v_{des}|} \min(|v_{des}|, v_{max})$$

$$\tau_{act} = 1.5k_t k_{gr} (v_{act} - v_{bemf}) \frac{1}{R}$$

其中 k_t 为磁链 *极对数， k_{gr} 为减速比。

4.2.4 实现

上述算法和图 4-7 的流程用 `c++`和Eigen 库实现,并对数据进行记录,使用 ROS 的 `rviz` 和 `rqt_plot` 进行可视化和参数读取。

开Ofast 后在 3700xCPU 上进行高精度的(0.00001s 步进值)进行仿真,仿真计算时间略短于实际时间, 即可以进行实时计算。

源代码仓库: https://github.com/QiayuanLiao/rm_suspension

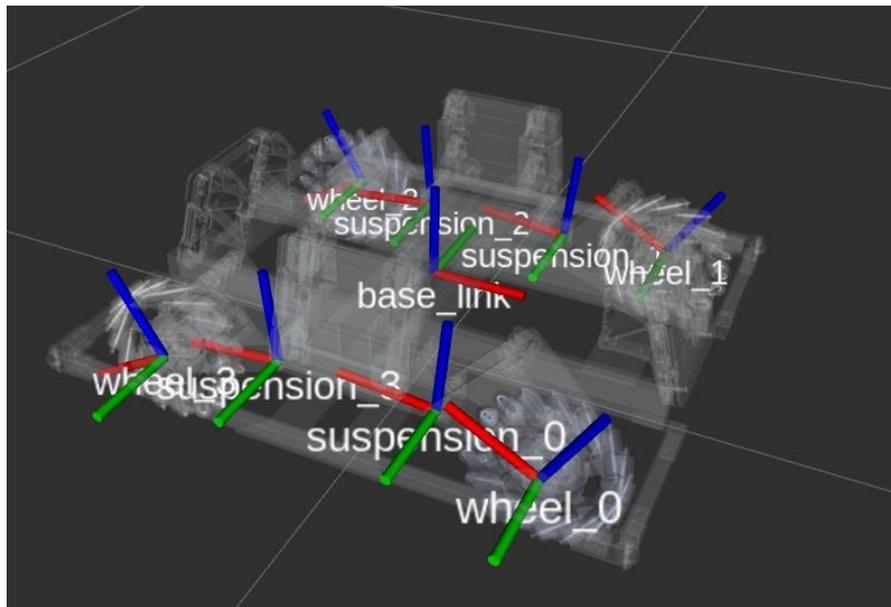


图4-7 各刚体的坐标系定义



图4-8 使用 Solidworks 获取各刚体的惯性张量

4.3 仿真实验的方法和结果

4.3.1 测试标准

1. 从 0.5m 高处下落

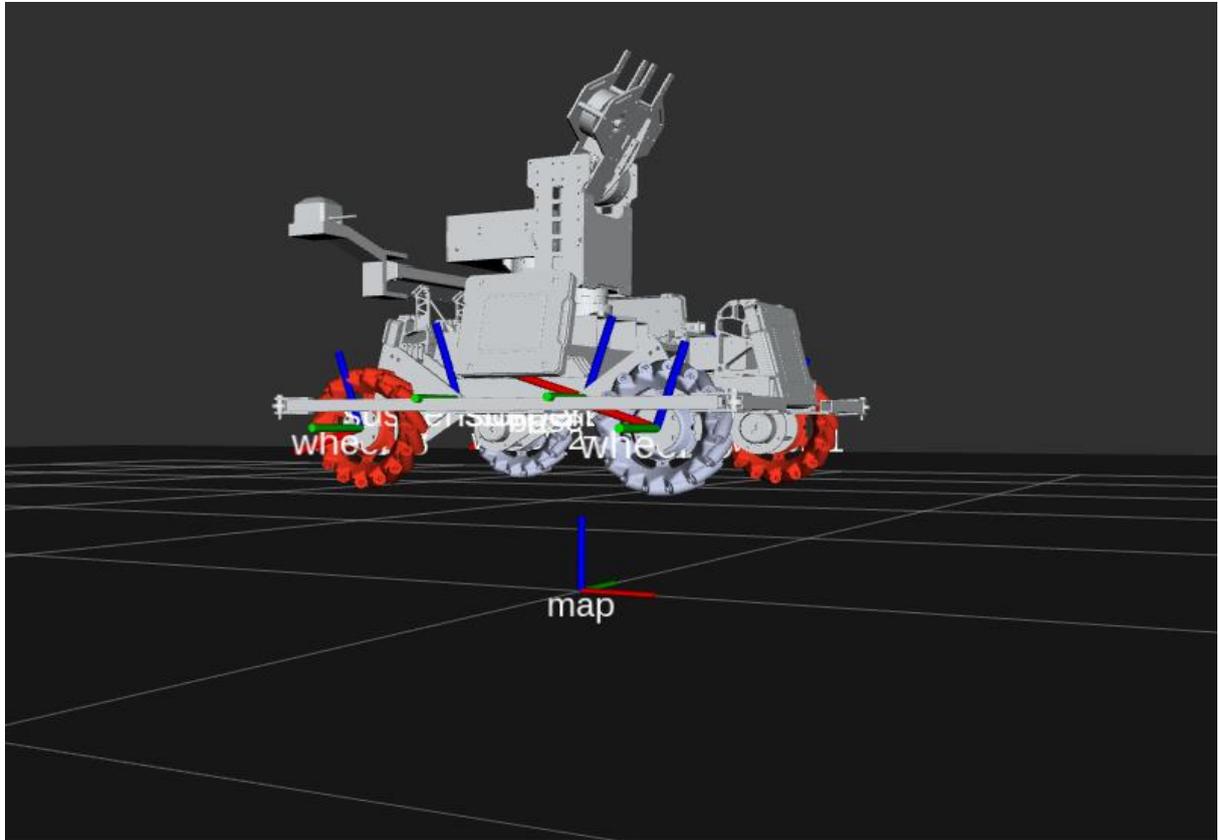


图4-9 从0.5m高处下落的仿真场景

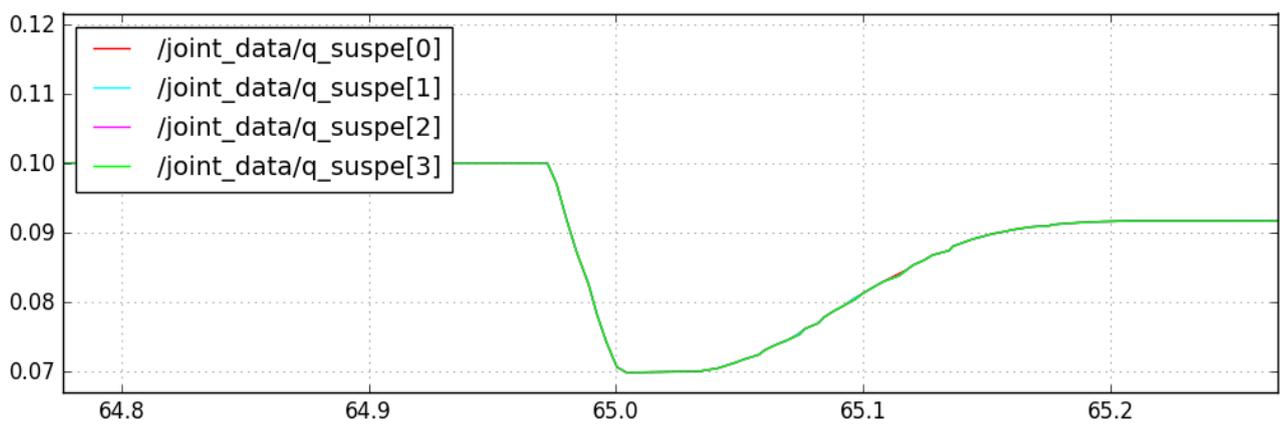


图4-10 弹簧长度的曲线变化图

如图 4-10，可以获取弹簧长度的变化长度，并且可以从图中看出弹簧恢复过程的波动。

要求：不能超过弹簧压缩范围，下落车身回弹一次即保持稳定，底盘不撞到地面。

2. 冲下阶梯

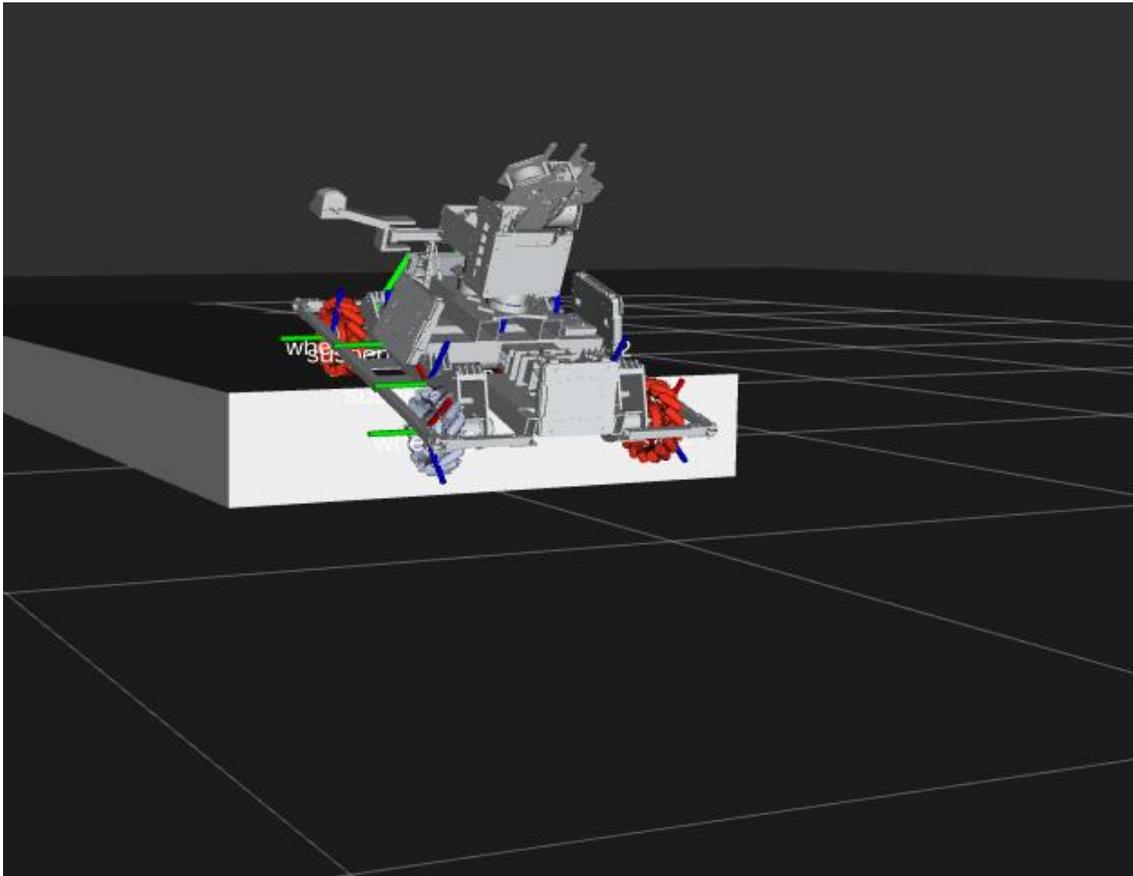


图4-11 冲下阶梯的仿真场景

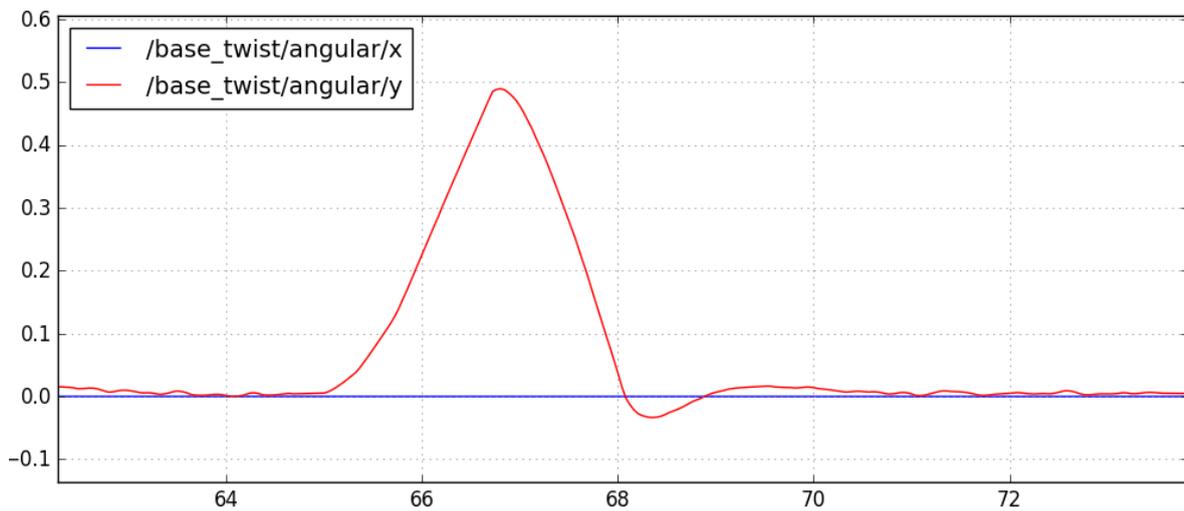


图4-12 底盘pitch轴的角度变化曲线

如图 4-12，可以获取底盘绕 Y 轴旋转的最大角度和后轮落地反弹导致的抬头角度，并且通过曲线的波动范围和恢复时间可以评判底盘悬挂对大的失稳状态适应性和调节性。

要求：不同速度冲下阶梯时弹簧行程不用尽，底盘不会卡住，后轮落地后四轮不再反弹离地，pitch 轴无大震荡。

3. 飞坡

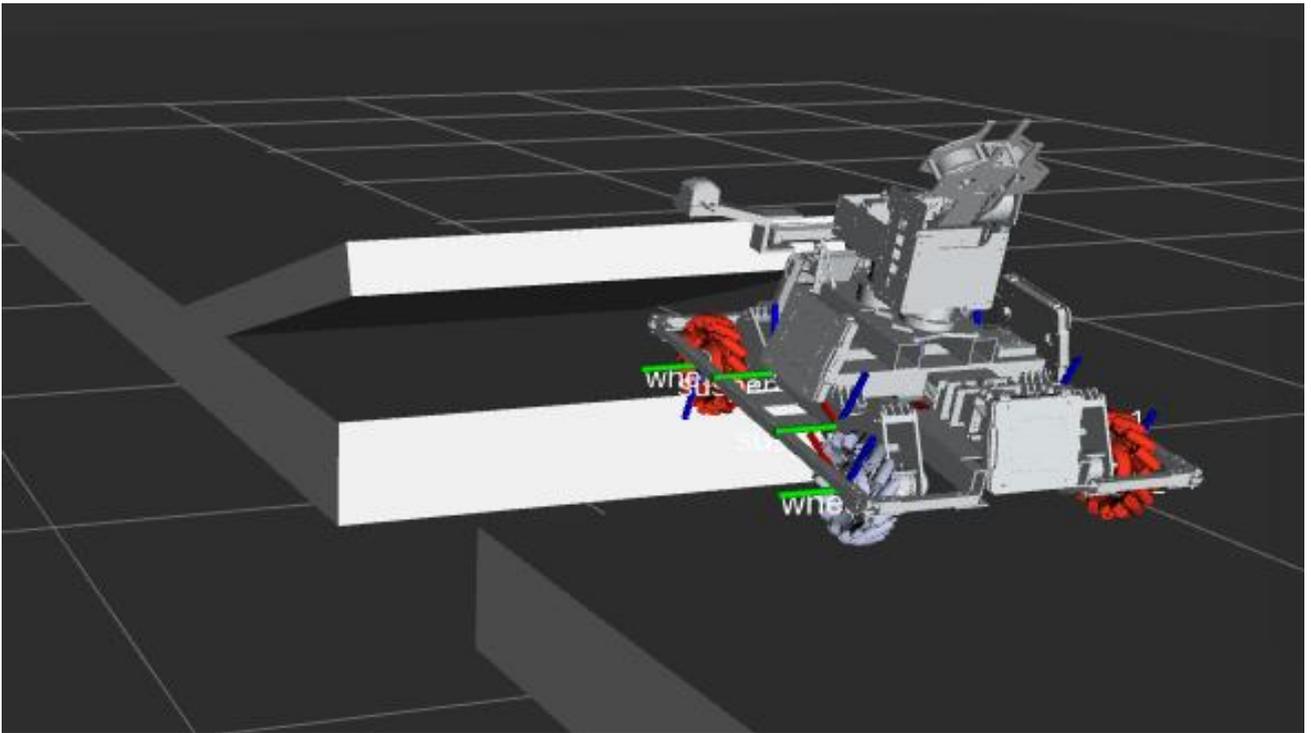


图4-13 飞坡的仿真场景

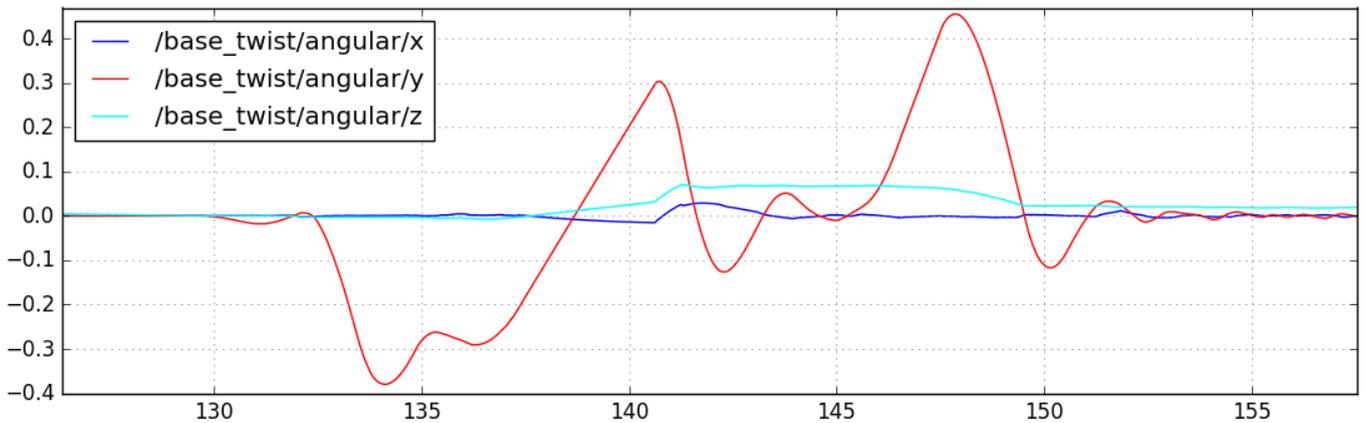


图4-14 底盘转动的角度变化曲线

如图 4-14，我们可以从图中获得 pitch 轴最大值，并且可以通过仿真中的场景直观的看到飞坡是否成功，进而判断一组参数对于飞坡性能的影响。

要求: pitch 轴偏转的最大值越小越好，并且探索出在一组参数内，一个适合飞坡的速度区间。

4. 在 X 方向上最大速度刹车

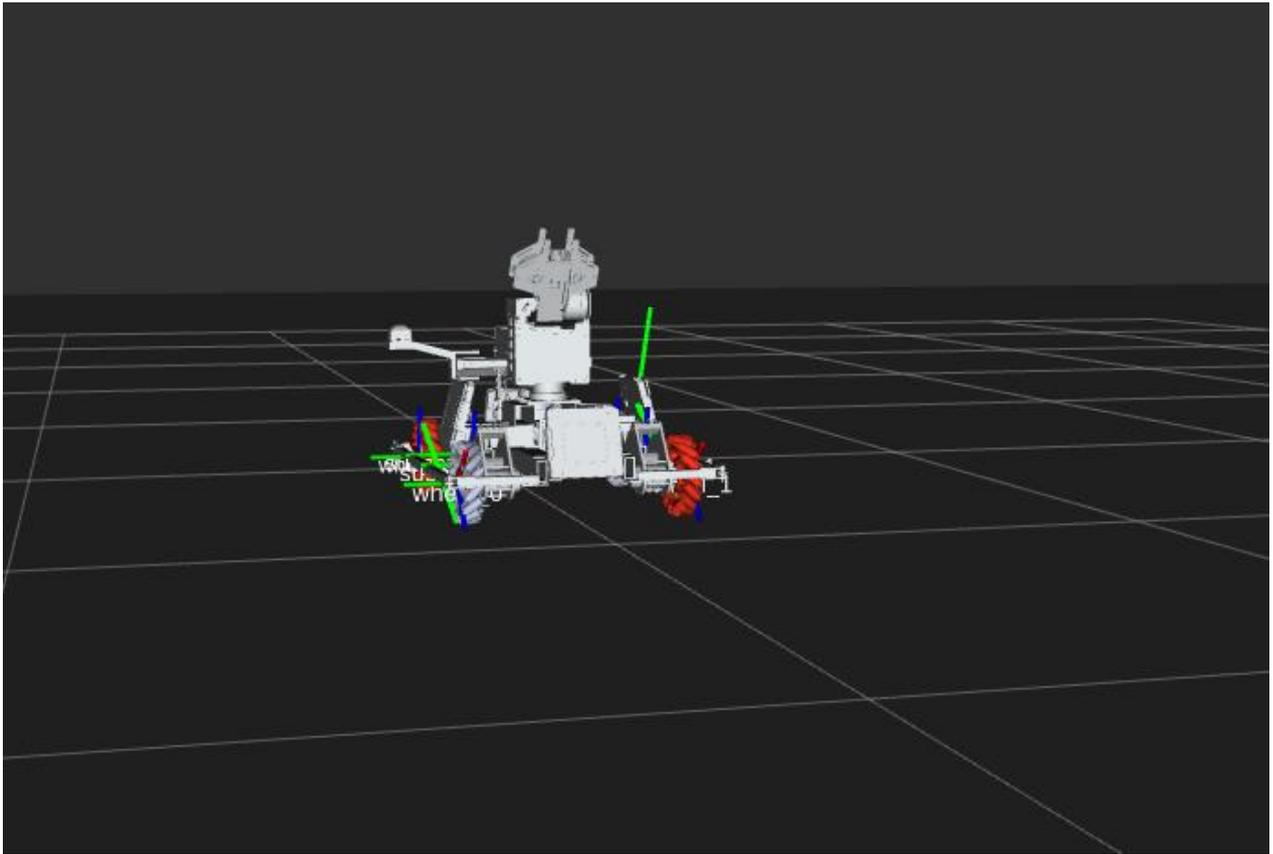


图4-15 在X方向上最大速度刹车的仿真场景

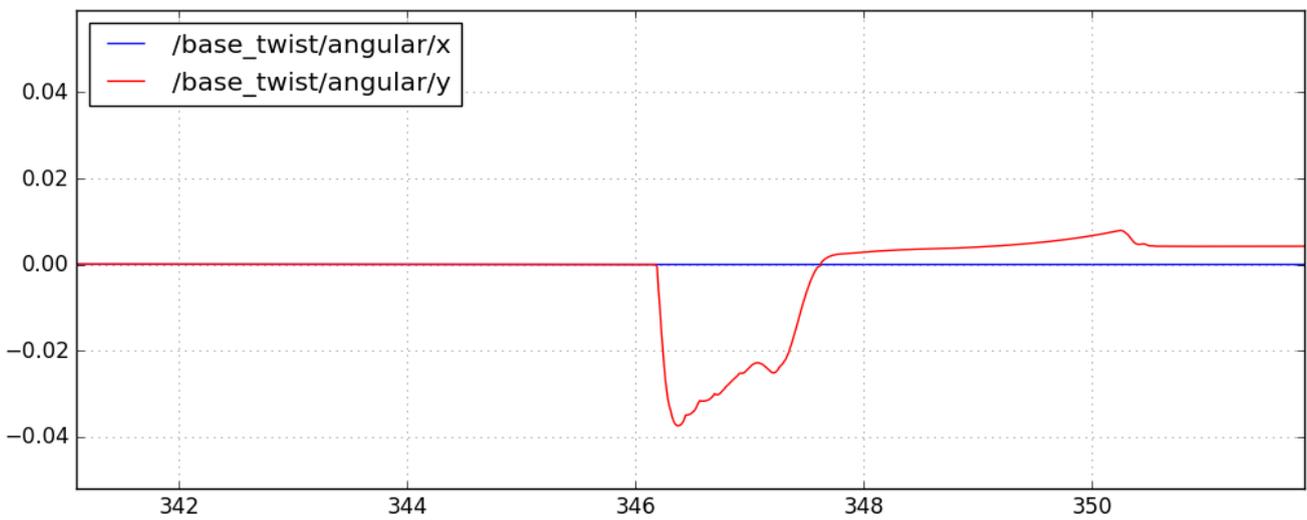


图4-16 底盘pitch轴的角度变化曲线

如图 4-16 可以获取车身在最大速度刹车点头角度，并可以看出车身有无恢复为水平状态。

要求：点头角度小于 0.03rad ，稳定后底盘回到水平状态。

5. Y方向上最大速度刹车

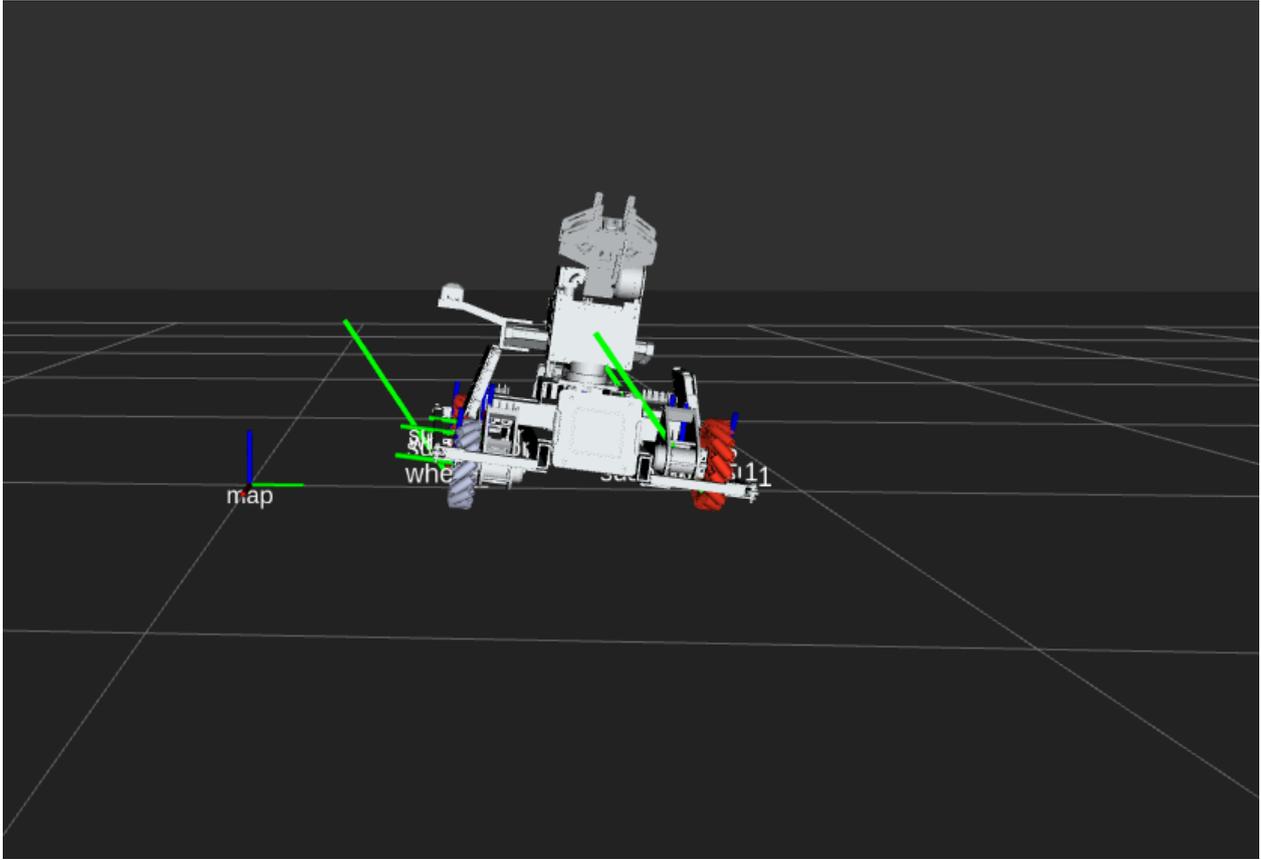


图4-17 在Y方向上最大速度刹车的仿真场景

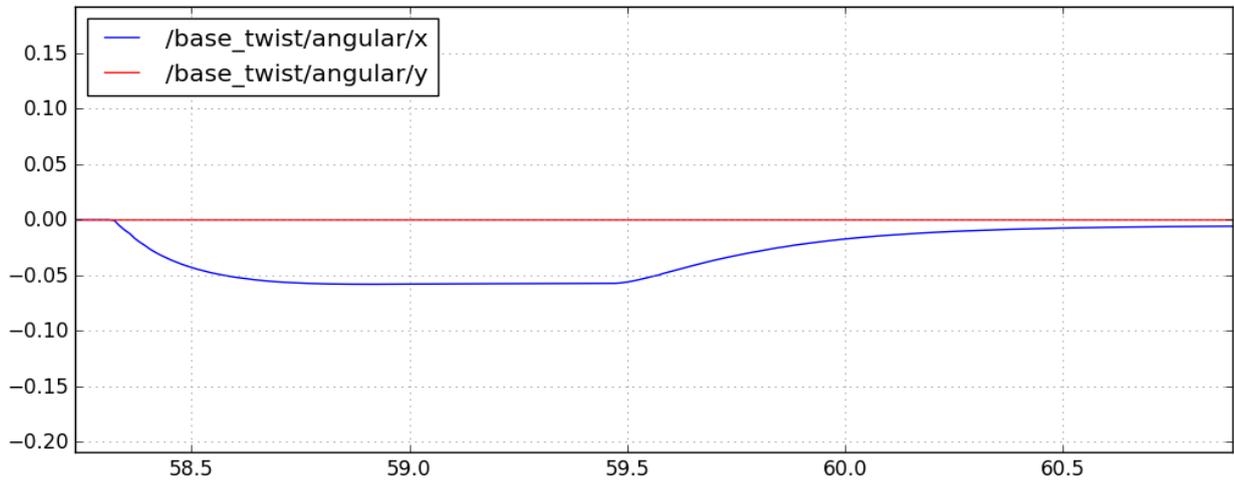


图4-18 底盘roll轴的角度变化曲线

如图4-18可以获取车身在最大速度刹车侧倾角度,并且可以看出车身有无恢复为水平状态。

要求: 侧倾角度小于 0.05rad , 稳定后底盘回到水平状态。

6. 斜对角上坡

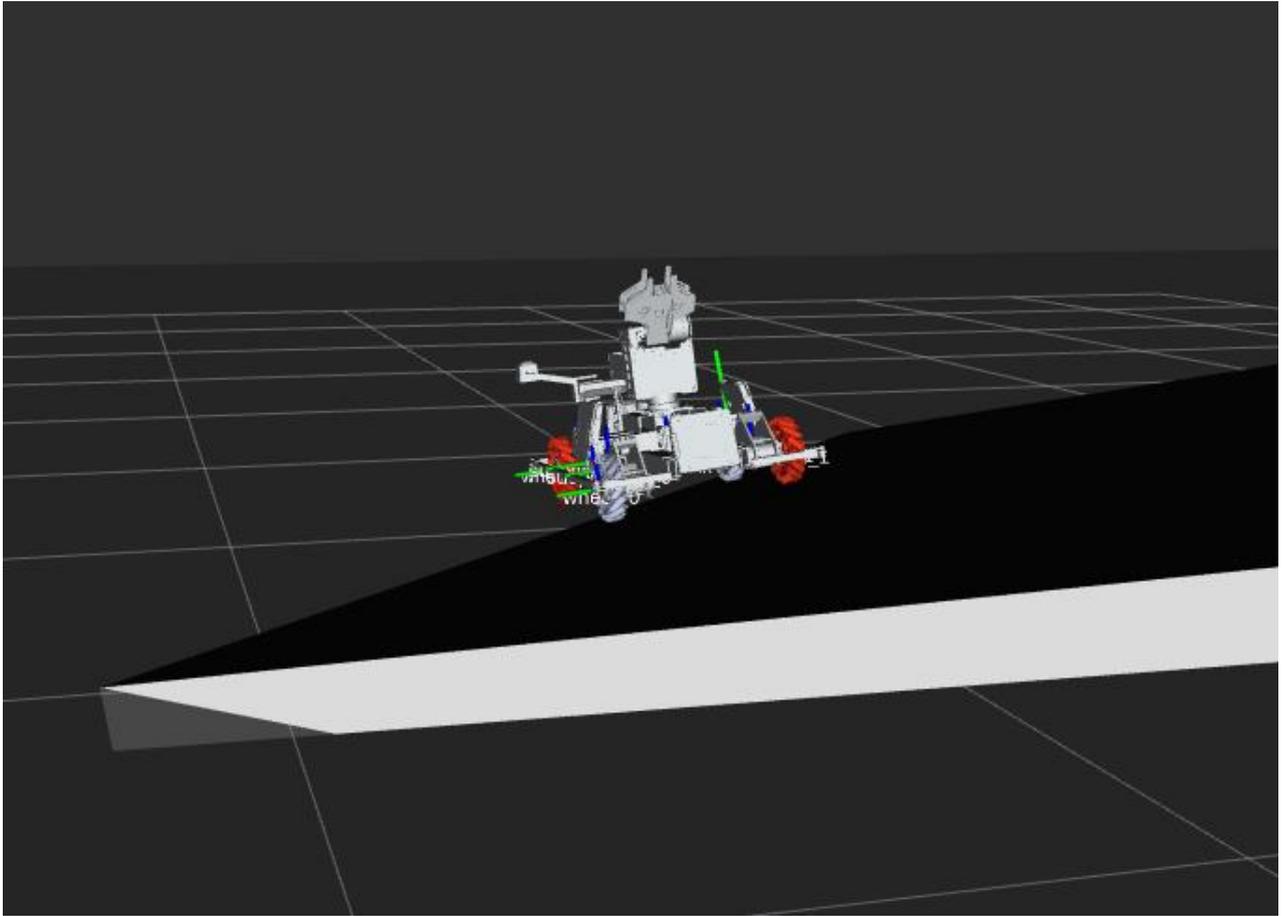


图4-19 显示在Y方向上最大速度刹车的仿真场景

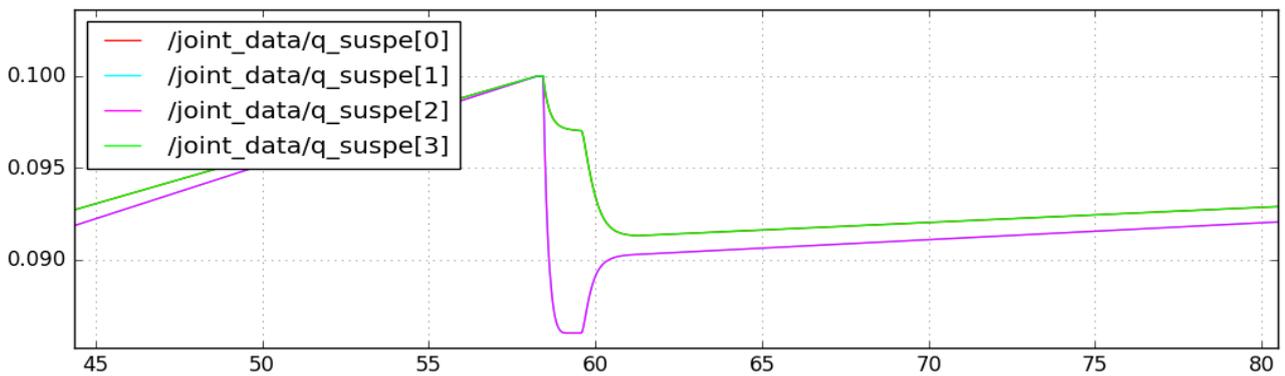


图4-20 弹簧长度的曲线变化图

如图 4-20，我们可以通过弹簧在底盘上斜坡整个过程的压缩量是否接近 0，来判断四轮有无离地。

要求：整个过程四个车轮都不能离地。

4.3.2 悬挂仿真数据分析和总结

在各个参数不互相影响的情况下，分别对各个参数进行分析，根据附录一的数据我们得到以下结论：

程序中的变量名	分析结果
spring_kp	弹簧弹性系数, 决定了减震器的“软硬程度”。
	参数较大: 在以较大的速度冲上斜坡时, 易发生前轮弹起离地; 在下落到地面时, 易反弹再次离地; 在斜对角上坡时, 易出现单轮离地; 都会导致车辆失控, 给操作手带来不便。
	参数较小: 在大外部冲击下, 调节效果变差; 在飞坡时, 更容易用尽行程, 容易损坏机械结构。
spring_kd	弹簧阻尼系数, 决定了减震器对能量的吸收能力。
	参数较大: 缓冲能力增强; 在飞坡时, 四轮易同时着地; 在斜对角上坡时, 易出现单轮离地。
	参数较小: 高速飞坡可能失败。
spring_preload	弹簧预压量, 决定四轮在平面时受力是否均匀。
	由于重心的偏移, 需要适当的预压参数让底盘保持水平. 当参数合适时, 可减小刹车时的点头角度, 并抑制点头后抬头的角度, 增加车身稳定性。
suspe_length0	图4-5 中悬架0号力臂长度
	参数较大: 与spring_kp较大相似; 在低速飞坡时, 该参数增大会使防撞框比前轮先触地, 有翻车的风险; 随着速度的增大, 可减小pitch轴的最大值, 但易导致飞坡的过程中车身发生侧偏, 前轮不同时着地。
	参数较小: 与spring_kp较小相似。
suspe_length1	图4-5 中悬架1号力臂长度
	参数较大: 与spring_kp较小相似。
	参数较小: 与spring_kp较大相似。
suspe_q_offset	图\ref{4-5}中悬架弹簧完全伸长时旋转角度的初始偏移量, 一般通过其他约束确定, 而不直接改变其值
	参数较大: 底盘过高, 点头越严重, 侧倾越严重, 影响车身稳定。
	参数较小: 底盘过低, 底盘易撞到地面, 通过角小。
suspeLocation	图4-6 中0号悬挂相对于base_link的位置。
	X轴值越大, 即轴距越大, 越稳定, 但底盘越容易触地; 飞坡时弹簧压缩量越小, 但是会增大在飞坡前轮离地时, 底盘姿态(主要为pitch轴)的变化。
	Y轴值越大, 即轮距越大, 侧倾越小, 小车越稳, 但底盘越容易触地。
	Z轴值大小实际上决定底盘高度, 同上述suspe_q_offset。
speed	飞坡速度是影响飞坡成功的主要因素
	2.8-3.4 m/s是一个较合适的飞坡速度区间。
	参数较大: 上坡过程中易出现前轮弹起离地, 导致车身在飞坡前姿态不稳定加大pitch轴的最大值或是后仰翻车。
	参数较小: 使底盘pitch轴最大偏转增大, 易导致车头防撞框着地, 损坏车架或翻车
body_com	图4-6 中, 车身重心在base_link中的位置
	X轴值较大: 低速度飞坡时pitch轴偏转较大, 易导致车头防撞框着地, 损坏车架或翻车。
	X轴值较小: 同speed较大。
	Z轴值较大: 飞坡时, pitch轴最大量增大, 易导致车头防撞框着地, 损坏车架或翻车, 且车身落地后波动起伏增大。
	Z轴值较小: 同speed较大, 甚至是上坡过程中出现前轮弹起离地后, 在后轮推动下前轮完全翘起车身后仰导致翻车

而对于不同参数同时造成的影响是耦合的，难以总结，但是我们可以设计出数以百计套参数，之后分别测试，选最优表现的参数制造。也可以在根据上述表格和仿真测试结果。